

AISLAMIENTO SISMICO DE RACKS DE TIPO SELECTIVO POR MEDIO DEL USO DE UN DISPOSITIVO CINEMÁTICO CON RESISTENCIA A TRACCIÓN

J. Viedma Sanhueza¹, N. Maureira Carsalade² y E. Nuñez Castellano³

RESUMEN

En la presente investigación se evalúa la efectividad del uso de aislamiento sísmico con un dispositivo cinemático en la reducción de la respuesta dinámica de racks de almacenamiento industrial frente a carga sísmica. Como respuestas de interés se consideró el desplazamiento relativo máximo de piso, la aceleración absoluta máxima y el corte basal máximo. El forzante sísmico fue caracterizado por medio del registro sísmico del terremoto del 27 de febrero de 2010 medido en la estación de Concepción, y escalado en el dominio de la frecuencia para hacer coincidir su espectro de respuesta con el espectro de diseño de la NCh2745 para zona 3, suelo tipo III y estructura de categoría D. Se consideraron racks de iguales dimensiones en planta y altura entre niveles, siendo analizadas estructuras de 2, 3, 4 y 5 niveles de almacenamiento. Se realizó un análisis paramétrico de dichos racks con incorporación de aislamiento basal utilizando el software Sap 2000. Se corrieron casos con combinaciones de cinco diferentes períodos de aislamiento y tres diferentes razones de amortiguamiento en la base. Las respuestas máximas de cada rack en cada uno de los casos con aislamiento basal fueron relativizadas a las correspondientes al mismo rack fijo en su base. Lo anterior con el fin de cuantificar la efectividad del uso de aislamiento basal al determinar en qué proporción se reducen las respuestas máximas de interés al incorporar esta tecnología. Los resultados mostraron que el aislamiento basal fue efectivo para reducir las tres respuestas consideradas en todos los casos analizados hasta en dos órdenes de magnitud. En general, al incrementarse el período de aislamiento todas las respuestas analizadas se redujeron monotónicamente. La adición de una mayor proporción de amortiguamiento crítico en la base en general condujo a una reducción del desplazamiento relativo de piso y del corte basal, pero tuvo el efecto opuesto en la aceleración absoluta de piso. En conclusión, se verificó que el uso de aislamiento basal es una estrategia muy efectiva para reducir la demanda sísmica en estructuras de racks de almacenamiento industrial.

Palabras clave: Aislador cinemático, disipación friccional, análisis tiempo-historia, análisis p-delta

ABSTRACT

In the present research the effectiveness of the use of seismic isolation with a kinematic device in the reduction of the dynamic response of industrial storage racks subjected to seismic load is evaluated. The maximum relative displacement of the levels, the maximum absolute acceleration and the maximum base shear load were considered as responses of interest. The seismic load was characterized by the seismic record of the earthquake of February 27, 2010 measured at the Concepción station, and scaled in the frequency domain to match its response spectrum with the design spectrum of the NCh2745 for zone 3, type of soil III and structure category D. Racks of equal dimensions in plan and height between levels and 2, 3, 4 and 5 storage levels were analyzed. A parametric analysis of these racks was performed using Sap 2000 software. Cases were run considering the rack fixed at its base and with combinations of five different isolation periods and three different reasons for damping at the base. The maximum responses of each rack in each of the cases with base isolation were relativized to those corresponding to the same rack but fixed at its base. The above in order to quantify the effectiveness of the use of base isolation

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jviedma@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, enunez@ucsc.cl

by determining in what proportion the maximum responses of interest were reduced by incorporating this technology. The results showed that base isolation was effective in reducing the three responses considered in all cases analyzed by up to two orders of magnitude. In general, as the isolation period increased, all the responses analyzed were monotonously reduced. The addition of a higher rate of critical damping at the base in general leads to a reduction in the relative displacement of the floor and the base shear load, but had the opposite effect on the absolute acceleration of the floor. In conclusion, it was verified that the use of basal insulation is a very effective strategy to reduce the seismic demand in industrial storage rack structures.

Keywords: Kinematic isolator, frictional dissipation, time-history analysis, p-delta analysis

1. INTRODUCCIÓN

El creciente aumento de la industrialización en el mundo ha llevado a los expertos a conseguir nuevas y mejores formas de almacenamiento, optimizando los espacios y permitiendo un adecuado traslado de los productos. Entre las diferentes soluciones industriales para almacenar mercancías y productos, los racks de acero para almacenamiento representan una de las soluciones más utilizadas. Estos consisten en una secuencia regular de marcos verticales conectadas entre sí por pares de vigas que llevan las unidades almacenadas [1]. El uso de racks para almacenamiento se ve introducido a mediados de 1970, con las "tiendas de almacén" que se han generalizado, sobre todo en América del Norte y Europa [2].

Los racks se han convertido en un elemento fundamental para el almacenamiento por lo que su uso se ha masificado. En principio, sus diseños estaban fuertemente controlados por carga de gravedad, con poca atención en la acción sísmica [3]. Actualmente los criterios de diseño sísmico para racks de almacenamiento se comparan con los de construcción de marcos. Sin embargo, estos se diseñan típicamente para resistir fuerzas mucho menores que lo que se requeriría según el estándar de estructuras. A pesar de las aparentes similitudes entre construcciones de marcos y estanterías de racks, hay una serie de diferencias esenciales que influyen en su diseño sísmico y el rendimiento, uno de ellos es que los marcos de estanterías no tienen diafragma rígido en cada nivel [4]. Es por esto que se han realizado en los últimos años numerosas investigaciones enfocadas en el desempeño y diseño sísmico de racks. En EEUU y Nueva Zelanda, donde existen normas vigentes utilizadas para diseño de racks y se han creado guías con recomendaciones para diseño de racks de gran altura. En la actualidad, el diseño de racks de almacenamiento de acero industrial en los Estados Unidos se lleva a cabo de acuerdo con la edición 2006 de las especificaciones publicadas por el Instituto de Fabricantes de rack (RMI) [9]. Mientras tanto en la Unión Europea (UE), la referencia que existe es la especificación EN15512 "Almacenaje en estanterías metálicas. Estantería regulable para carga paletizada, Principios para el diseño estructural." Este código, que está en proceso de ser actualizado en los próximos años, es la evolución de las recomendaciones FEM 10.2.08 [1].

Los procedimientos de diseño teórico han sido completamente definidos sólo para algunos tipos de sección transversal, como canal, ángulo y secciones transversales de sombrero. Estas son las más comúnmente utilizadas en marcos, construcciones metálicas y viviendas ligeras. Sin embargo, estas secciones son a menudo diferentes de las utilizadas típicamente en los sistemas estructurales para almacenar de bienes y productos [1].

En particular, los sistemas de estanterías de almacenamiento de acero corresponden a estructuras que son bien conocidos por el hecho de que llevan cargas vivas mucho más grandes que su peso propio y además poseen una considerable altura [6]. Desde un punto de vista estructural, los racks selectivos son generalmente arriostrados sólo en la dirección transversal, debido a la imposibilidad de localizar longitudinalmente sistemas de arriostramiento sin reducir la capacidad de almacenamiento [1].

Actualmente en Chile no existe una norma exclusiva para diseño sísmico de racks, por lo que se debe cumplir con las exigencias para una estructura metálica de perfiles conformados en frío. Desafortunadamente, los mismos métodos utilizados para reforzar los bastidores también generan que ellos se endurezcan, introduciendo de este



modo niveles de aceleración más altas en el bastidor durante un terremoto causando derramamiento de material, que de otro modo podrían permanecer en los bastidores [2].

En términos económicos existe una gran pérdida producida por la caída de los productos almacenados, sobre todo si se trata de productos delicados que se almacenan a gran altura. Debido al uso que se les da a estos estantes, se consideran estructuras de poco volumen en comparación a su alto volumen de material almacenado. Es por ello que las pérdidas económicas más importantes se concentran en pérdida de material por caídas, por sobre las pérdidas de daños producidos a la estructura en sí. Otro factor que resulta bastante importante al cuantificar pérdidas es el tiempo de inactividad que se presenta en la tienda o fábrica debido a la reposición de productos. Una solución antisísmica podría resultar bastante beneficiosa al momento de reducir estos daños. Lo anterior motivó el desarrollo de esta investigación que tiene por objetivo el determinar la efectividad del uso de aislamiento sísmico en la reducción de la respuesta de racks de tipo selectivo en términos de deriva de piso, aceleración absoluta y corte basal.

Se establece como hipótesis que el uso de aislamiento basal puede traer beneficios en la disminución de pérdidas de material almacenado por la reducción de la aceleración en los pisos debido al desacoplamiento de la estructura con el suelo al momento de la ocurrencia de un sismo de alta intensidad. Adicionalmente el aislamiento sísmico permite la reducción de otras respuestas de la estructura como son los desplazamientos relativos y el corte basal que otorgan mayor seguridad para la estabilidad de la estructura y su usuario.

Lo anterior motivó el desarrollo de esta investigación que tiene por objetivo general el determinar la efectividad del uso de aislamiento sísmico en la reducción de la respuesta de racks de tipo selectivo en términos de deriva de piso, aceleración absoluta y corte basal.

Se consideran también los objetivos específicos siguientes:

- Definir la tipología de los racks a ser analizados, dimensiones y números de pisos, las cargas y combinaciones a la que este se ve sometido.
- Realizar un análisis tiempo-historia de los racks con apoyo fijo, condición inicial y obtener los valores de desplazamiento relativo, aceleración relativa y fuerza de corte basal.
- Obtener los valores de desplazamiento relativo, aceleración relativa y fuerza de corte de las estructuras con aislamiento mediante un análisis no lineal tiempo-historia.
- Comprobar la efectividad de la implementación del sistema de aislamiento en términos de reducción de las tres respuestas de interés consideradas en el objetivo general.

2. METODOLOGÍA

Para verificar los objetivos planteados se realizó un análisis numérico tiempo-historia en el software Sap2000 con el objetivo de determinar la efectividad del uso de un sistema de aislamiento cinemático en la reducción de la respuesta del rack. Se realizaron modelos de racks con los apoyos fijos y luego se crean modelos en los cuales se implementan los aisladores en la base, extrayendo los parámetros de respuesta estructural relevantes. Se asumió que estas secciones se someten a múltiples excursiones en la gama inelástica, seguida a menudo por su degradación mecánica gradual causado por los ciclos de carga y descarga [7]. Se modeló en el software el comportamiento del dispositivo de aislamiento cinemático tanto en su componente elástica que proporciona la rigidez lateral, como en su capacidad de amortiguamiento proporcionado por la fricción en la rótula de bola en su base.

Se analizaron numéricamente modelos de racks del tipo selectivo con 4 diferentes alturas: 2, 3, 4 y 5 pisos; con 5 periodos de aislación: 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 y 5s para los racks de 2 y 3 pisos y 4 periodos de aislación: 3, 3.5, 4, 4.5 y 5s, para los racks de 4 y 5 pisos. En términos de amortiguamiento consideraron tres razones de amortiguamiento equivalente en la interfaz de aislamiento: 5%, 10% y 15%. Se corrieron en total 66 modelos con solución de aislamiento, todos sometidos a un único registro sísmico escalado en el dominio de la frecuencia para hacer coincidir su espectro de respuesta con el espectro de diseño de la NCh2745 para zona 3, suelo III y categoría de

edificio D. Para cada rack antes mencionado se realizó el análisis sísmico considerando condición fija en la base, la cual se consideró como referencia para cuantificar la efectividad del uso de aislamiento basal.

Para facilitar la identificación de cada caso de análisis, se estableció una nomenclatura que considera lo siguiente:

af_x: indica un modelo de apoyo fijo con “x” pisos, por ejemplo, af_3 es el modelo de apoyo fijo de 3 pisos

ca_x_y_z: indica un modelo con aislamiento de “x” pisos, con periodo de aislamiento “y” en segundos, porcentaje de amortiguamiento crítico “z”, por ejemplo, ca_3_4_5 indica un modelo con aislamiento, de 3 pisos, 4 segundos de período de aislamiento y una razón de amortiguamiento del 5%.

2.1. Disposiciones de la NCh2745

Para el diseño de dispositivos de aislamiento sísmico es necesario cumplir con los requisitos establecidos en la NCh2745. Uno de dichos requisitos es la demanda de desplazamiento mínimo D_D que depende del tipo de suelo, la zona sísmica y el amortiguamiento efectivo, el cual se define como:

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} \quad (1)$$

Donde:

$C_D = 330Z$ para suelo tipo III

$Z = 5/4$ para zona sísmica 3

$B_D =$ Factor que depende del amortiguamiento efectivo (Tabla 2 de la NCh2745)

Las demandas de desplazamiento correspondientes a las tres razones de amortiguamiento crítico considerados en la interfaz de aislamiento se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Demandas de desplazamiento en la interfaz de aislamiento para cada modelo analizado.

Caso de análisis	Amortiguamiento crítico en interfaz de aislamiento, ξ_b (%)	Demanda de desplazamiento en interfaz aislamiento, D_D (cm)
ca_x_y_5 ⁽¹⁾	5%	41.25
ca_x_y_10 ⁽¹⁾	10%	34.37
ca_x_y_15 ⁽¹⁾	15%	33.00

(1) x=2, 3, 4 y 5 pisos; y= 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 y 5s de período de aislamiento.

Otro punto a considerar de la NCh2745 es el espectro de diseño para suelo tipo III.

Se establece que no se puede diseñar con un corte menor al de una estructura de base fija con el mismo periodo. Esta última se rige por lo establecido en la NCh433 en cuanto al corte basal de diseño. Para las variables relacionadas se establece que la estructura se encuentra en la zona sísmica 3 con un suelo tipo III, luego se considera el corte mínimo establecido en la NCh433 que se define como:

$$Q_0 = C \cdot I \cdot P \quad (2)$$

Donde

C = Coeficiente sísmico que se define como $C = \frac{A_0}{6g}$ para corte mínimo

I = Coeficiente relativo al edificio y su clasificación para este caso es 0.6

P = Peso total del edificio, para este caso se considera peso propio y el 50% de la sobrecarga

2.2. Análisis tiempo-historia

Como lo indica la NCh2745 se recomienda verificar el diseño de estructuras con aislamiento sísmico mediante un análisis no-lineal de respuesta en el tiempo [10]. Para lo anterior se consideró como base el registro del terremoto del 27 de febrero de 2010, medido en la estación de San Pedro de la Paz. El registro fue escalado en el dominio de la frecuencia para lograr que su espectro de respuesta se ajustara al espectro de diseño de la NCh2745 para zona 3, suelo III y categoría de edificio D. En la Figura 1 se puede observar el espectro de respuesta del registro sísmico compatibilizado, el espectro de diseño de la NCh2745 y el espectro de diseño del registro original. Se observa una considerable aproximación del espectro compatibilizado con el de la norma.

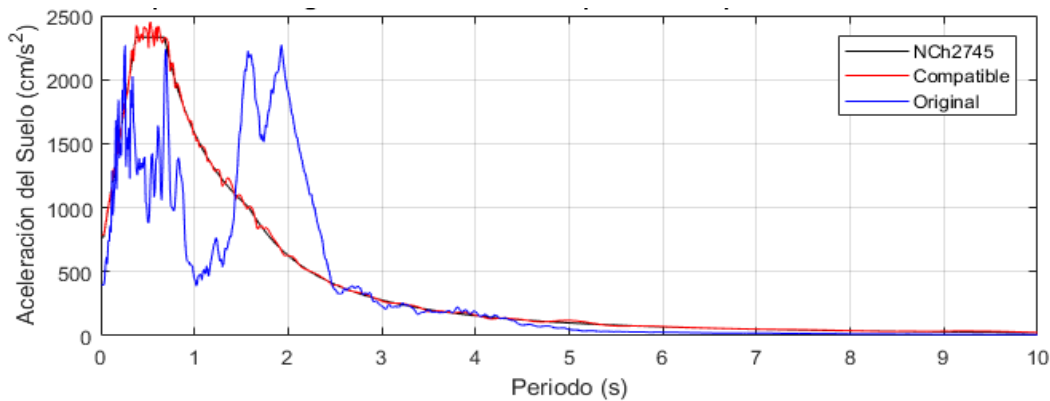


Figura 1: Espectros del diseño de la NCh2745, registro sísmico y registro compatible

Para el modelamiento numérico se utilizó el software Sap 2000 versión 20.2.0. En él se ingresó el input del registro compatibilizado en la opción de “function”, con un paso de tiempo de 0.005s.

2.3. Dispositivo de aislamiento

La solución antisísmica consiste en un dispositivo cinemático que permite el deslizamiento de la superestructura por sobre una superficie cóncava con radio constante. Como se muestra en la figura el dispositivo se encuentra sobre una rotula y posee un cable que conecta la parte superior con la base de la superestructura. El aislador posee un radio de curvatura definido y una altura variable que se ajusta, permitiendo la variación del periodo de aislamiento. En la base del aislador se dispone de una rotula que genera un amortiguamiento por el roce que este produce cuando el dispositivo se activa, físicamente se puede diseñar con cierto amortiguamiento requerido

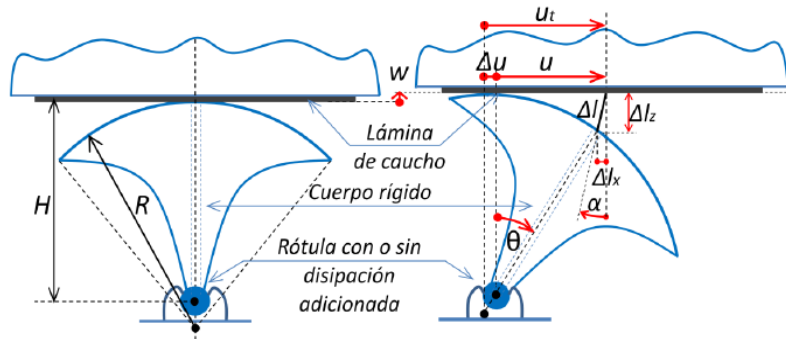


Figura 2: Dispositivo de aislamiento sísmico cinemático con resistencia a tracción.

Fuente: Maureira (2018) y Pardo et al (2019)

2.4. Modelo histerético

Para describir el comportamiento del aislador cinemático se trabaja con el ciclo histerético que este produce debido a sus características físicas, este ciclo describe la relación fuerza- desplazamiento que existe en el dispositivo. Los parámetros de entrada son la rigidez efectiva, K_{ef} , fuerza de fluencia, F_y , desplazamiento de diseño u_m , obtenidos como D_D y el desplazamiento de fluencia u_y como se muestra en la figura:

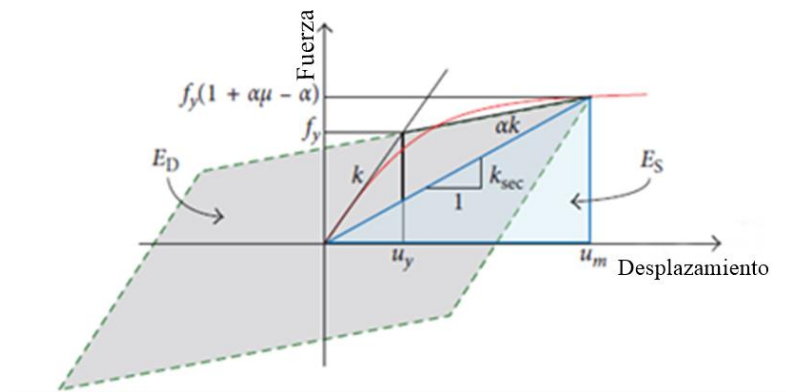


Figura 3: Curva histerética bi-lineal característica del dispositivo de aislamiento usado en los análisis.

Fuente: Adaptado de Zirakian et al (2019).

La figura 3 describe el comportamiento del sistema de aislamiento en términos de fuerza lateral versus desplazamiento horizontal. Se observa un rango elástico inicial con una elevada rigidez k , hasta que se alcanza el desplazamiento de fluencia u_y y correspondiente fuerza de fluencia f_y . Superado éste último desplazamiento la rigidez lateral del aislador se reduce en un factor $\alpha < 1$. Se puede observar en este rango como con pequeños aumentos de fuerza, se generan grandes desplazamientos, hasta llegar al máximo desplazamiento esperado u_m . En un ciclo completo de carga y descarga, el área encerrada dentro de la curva corresponde a la energía disipada, E_D . En el aislador cinemático utilizado, esta energía es disipada por mecanismos de roce [10].

La energía disipada en este ciclo, E_D , se obtiene como el área contenida en el mismo y que está dada por:

$$E_D = 4 \cdot f_y \cdot u_m \quad (4)$$

La capacidad de disipación de energía de la interfaz de aislamiento del rack se puede relacionar con una razón de amortiguamiento crítico, aun cuando el mecanismo de disipación del dispositivo de aislamiento es por roce y no viscoso. Para lo anterior, se hace una equivalencia entre la energía disipada en un ciclo de movimiento armónico

de un sistema de un grado de libertad de masa M , razón amortiguamiento ζ , y período natural T_n igual al período de aislamiento rack analizado, T_a . La respuesta del oscilador de un grado de libertad ante forzante armónico en término de desplazamiento y velocidad es de la forma indicada en la ecuación (5).

$$\begin{aligned} u(t) &= u_m \cdot \sin(\omega_a t) \\ \dot{u}(t) &= u_m \cdot \omega_a \cdot \cos(\omega_a t) \end{aligned} \quad (5)$$

La fuerza viscosa actuando en el oscilador de un grado de libertad, $F_d = C \cdot \dot{u}$, donde $C = 2\zeta\omega_n M$ — $\omega_n = \omega_a$ —. Esta es la que disipa energía, por lo tanto, la energía disipada por en un ciclo completo por el sistema visco-elástico está dada por la ecuación (7), y corresponde al área de la elipse que forma la fuerza F_d en un ciclo (Figura 4).

$$E_D^{(v.e.)} = \oint C \dot{u} du = 2\pi\zeta M \omega_a^2 u_m^2 \quad (6)$$

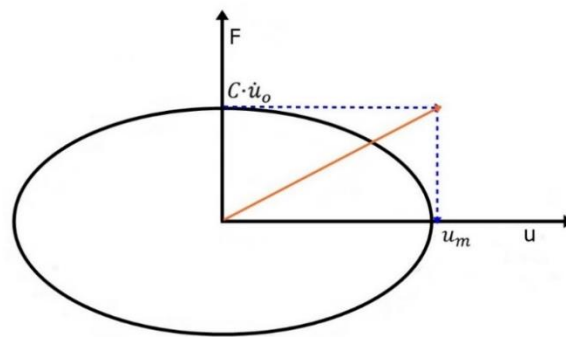


Figura 4: Curva carga-desplazamiento de un ciclo armónico visco-elástico

La energía disipada en un ciclo histerético no lineal correspondiente al sistema de aislamiento usado, considerando un rack de igual masa M que el sistema visco-elástico de un grado de libertad antes mencionado, corresponde al área encerrada en la curva de la Figura (3) y está dada por la ecuación (7).

$$E_D^{(h.n.l)} = \oint F_{nl} du = 4(1 - \alpha) f_y u_m \quad (7)$$

Igualando la energía disipada en un ciclo visco-elástico con la correspondiente al ciclo histerético de la estructura de rack con aislamiento basal, se puede despejar la fuerza de fluencia como:

$$f_y = \frac{1}{2(1-\alpha)} \pi\zeta M \omega_a^2 u_m \quad (8)$$

El desplazamiento u_m que figura en la ecuación (8) corresponde al desplazamiento máximo esperado en el análisis. Este puede ser estimado a priori con base en la demanda establecida por el espectro de desplazamiento de la NCh2745.

Otro parámetro relevante para el diseño es la rigidez efectiva del aislador, K_{ef} , la cual corresponde a la rigidez secante. Esta puede ser determinada con base en la frecuencia de aislamiento, ω_a , la cantidad de aisladores en la interfaz de aislamiento, n , y la masa sísmica del rack, M , como se indica en ecuación (9)

$$K_{ef} = \frac{1}{n} \cdot \omega_a^2 \cdot M \quad (9)$$

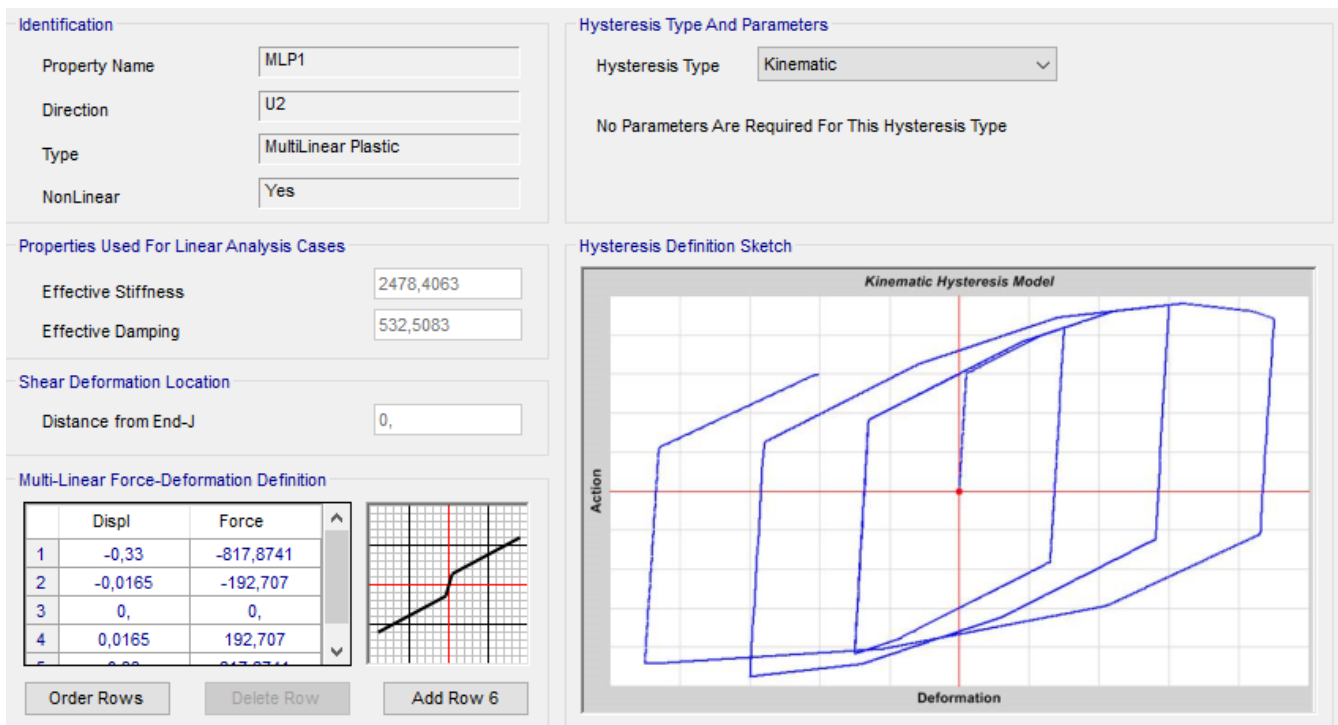
El valor de desplazamiento de fluencia se considera igual al 5% del máximo desplazamiento de diseño (ecuación 10). Esto sólo para efectos de modelamiento en el software Sap 2000, el cual cuanto con la formulación bilineal como la más parecida al comportamiento analítico del aislador cinemático considerado (Pardo et al, 2019). Este desplazamiento es el típicamente utilizado en aisladores de goma de alto grado de amortiguamiento, como se indica en la NCh2475.

$$u_y = 0.05u_m \quad (10)$$

2.5. Análisis dinámico tiempo-historia

Los parámetros antes descritos definen la ecuación característica del sistema de aislamiento. Este fue modelado en el software Sap 2000 utilizando el elemento de link del tipo “multilinear-plastic”. En éste sólo se consideraron como activos dos grados de libertad, en direcciones X e Y, correspondientes a las direcciones horizontales. Se consideraron como restringidos los demás grados de libertad del link. Se utilizó el modelo de histéresis cinemática o “Kinematic” incluido en las opciones de análisis del software usado. Este modelo se basa en el comportamiento de endurecimiento cinemático que se observa comúnmente en los metales, el cual es similar al modelo de disipación pro fricción. Este modelo disipa una cantidad significativa de energía y es apropiado para materiales dúctiles [5].

En este modelo se ingresaron los puntos *peak* del ciclo fuerza-desplazamiento, partiendo por el origen en (0,0), luego el punto de fluencia (u_y, f_y), hasta el punto extremo (u_m, f_m). Estos puntos se replican en sus valores negativos para completar el ciclo, como se muestra en la Figura 5.



Identification

Property Name: MLP1
 Direction: U2
 Type: MultiLinear Plastic
 NonLinear: Yes

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Kinematic
 No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 2478,4063
 Effective Damping: 532,5083

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0,

Multi-Linear Force-Deformation Definition

	Displ	Force
1	-0,33	-817,8741
2	-0,0165	-192,707
3	0,	0,
4	0,0165	192,707
5	0,33	817,8741

Hysteresis Definition Sketch

Kinematic Hysteresis Model

Action

Deformation

Figura 6: Parámetros del link multilinear plástico con endurecimiento cinemático en SAP2000

Se utilizó un algoritmo de resolución de la ecuación diferencial del movimiento (EDM) de tipo paso a paso. Esto corresponde a una resolución numérica a incrementos de tiempo finitos. La fase del análisis que consume más tiempo es la solución del problema del valor propio. Si el orden de las matrices es grande, el tiempo de computadora requerido para resolver todos los valores y vectores propios puede ser enorme [8]. Por lo anterior, se selecciona en el software la opción que utiliza vectores de Ritz para determinar valores y vectores propios, considerando truncamiento modal al 90% de la masa modal equivalente para reducir el tiempo de cálculo. Para la resolución de la EDM se seleccionó el método de integración Hilber-Hughes-Taylor inserto en el software con una tolerancia de convergencia de 0.0001, considerando un paso de tiempo de 0.005s para la correcta convergencia del método.

2.5. Descripción del modelo estructural de racks analizados

Se analizaron 4 racks, que están diseñados bajo igualdad de condiciones tanto en la sobrecarga de cada piso, su estructuración y perfiles ocupados. Todos poseen las mismas dimensiones en cuanto a largo y ancho en planta y altura entre vigas (ver Tabla 1). Solamente varía su altura debido a la cantidad de niveles, que parte desde los 2 hasta los 5 niveles. Se analizó un total de 4 estructuras de racks, como se muestra en las siguientes Figuras 7 a la 10.

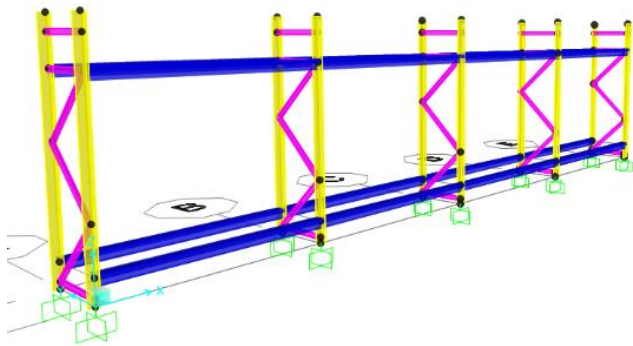


Figura 7: Rack de 2 pisos

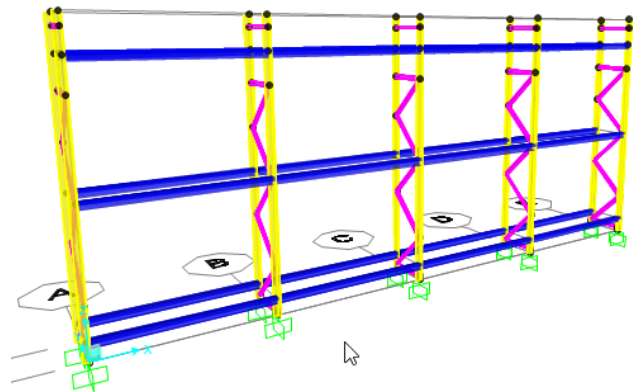


Figura 8: Rack de 3 pisos

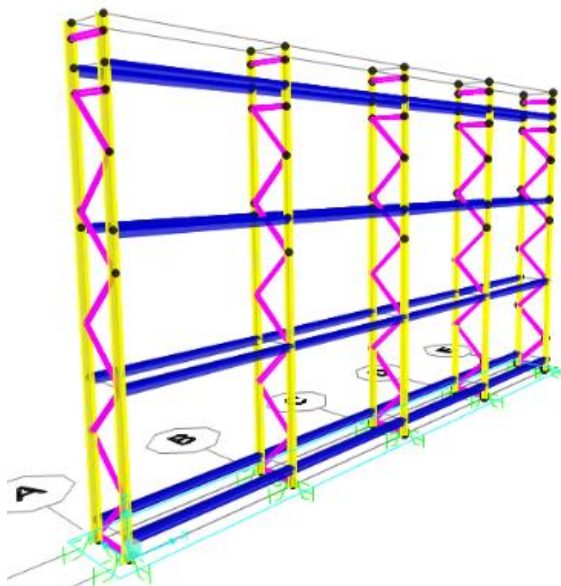


Figura 9: Rack de 4 pisos

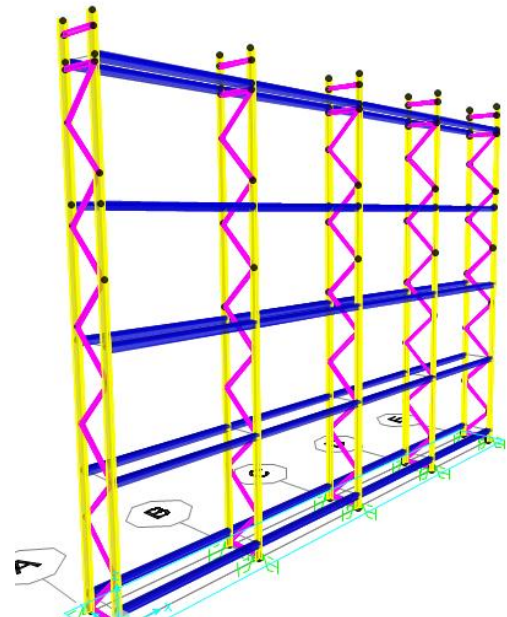


Figura 10: Rack de 5 pisos

Las dimensiones de los racks de estudio están resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 1: Dimensiones de los racks analizados.

niveles	Largo	Ancho	Altura
2 pisos	10.8m	0.745 m	2.715 m
3 pisos	10.8m	0.745 m	4.615 m
4 pisos	10.8m	0.745 m	6.515 m
5 pisos	10.8m	0.745 m	8.415 m

Todos los modelos de racks analizados en su condición fija en la base poseen restricciones del tipo empotramiento en su nivel de apoyo con el suelo.

En los modelos con aislamiento se liberan los grados de libertad de movimiento horizontal de la base, quedando éstos vinculados a los links “multilinear-plastic” utilizados para modelar los aisladores. El link incluye restricción de giro en los tres ejes ortogonales y restricción de desplazamiento vertical, mientras que los desplazamientos horizontales en ambos ejes de la planta quedan libres y vinculados al suelo por la fuerza impuesta por los aisladores.

En columnas y vigas de los racks se consideraron los perfiles que se muestran en Figuras 11 a la 14:

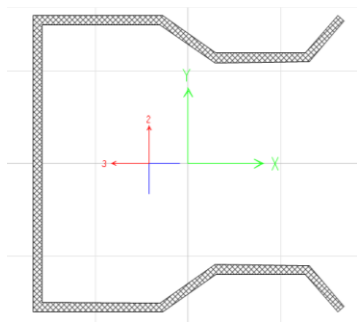


Figura 11: Perfil Columna: Tx 100x105x3

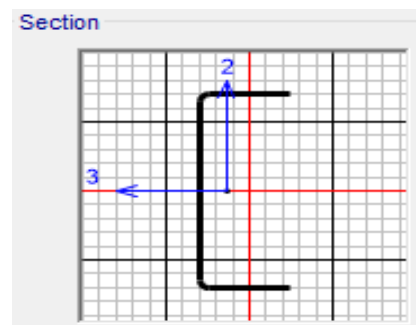


Figura 12: Perfil diagonal en reticulado C58x25x2

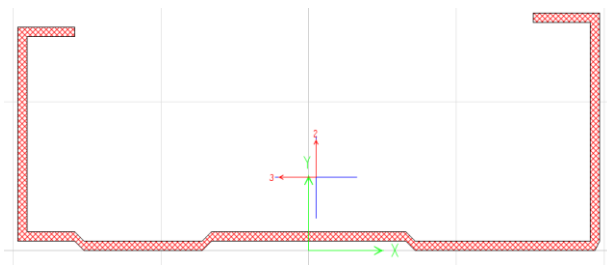


Figura 13: Pilar de viga: Tx 100x105x3

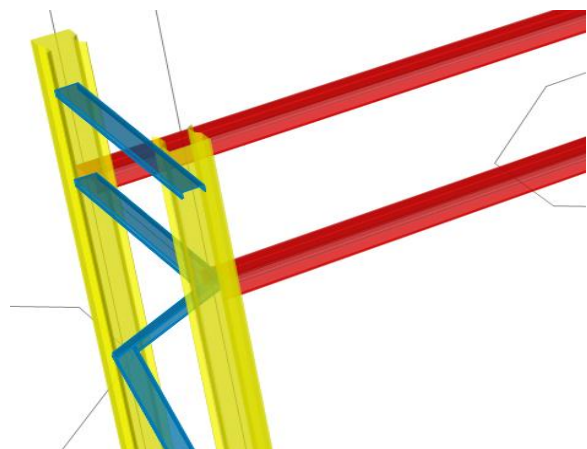


Figura 14: Conexión entre elementos estructurales

2.6. Cargas de diseño y análisis

Se realizó el análisis considerando sobrecargas por almacenamiento en todos los pisos siendo esta de 9740 N/m²/piso. La carga se incluyó como carga distribuida por unidad de longitud en las vigas de cada nivel, tributando la mitad de la carga a cada una (Figura 15).

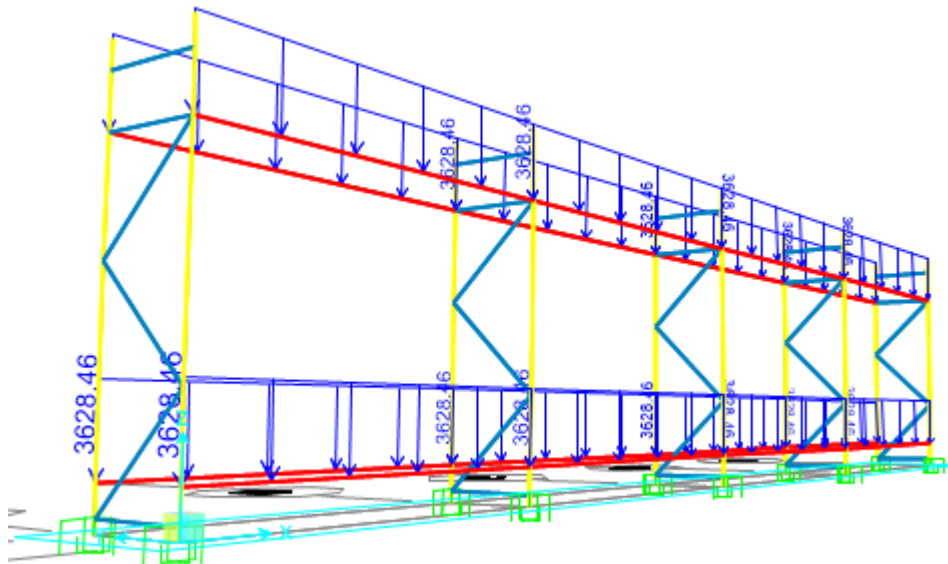


Figura 15: Sobrecarga de almacenamiento (N/ m)

Se consideró el efecto p-delta como lo señala la NCh2745 debido a las altas deformaciones que presenta la estructura. Para lo anterior se incluyó en el análisis la opción “p-delta de segundo orden” y se ingresó como un caso no lineal estático considerando las cargas de peso propio y sobrecarga de diseño.

La acción del sismo se consideró en ambas direcciones ortogonales de la planta por separado. Se utilizó en ambos casos el mismo registro sísmico compatible con el espectro de la NCh2745 antes mencionado.

En los análisis realizados para la determinación de las respuestas de interés máximas, se consideraron las siguientes combinaciones de carga:

D

$D + L$

$D + 0.5L$

$D + 0.75L + 0.75S_x$

$D + 0.75L + 0.75S_y$

S_x

S_y

Donde:

D= peso propio

L= sobrecarga de almacenamiento

S_x = carga sísmica dirección larga

S_y = carga sísmica dirección corta

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Debido al alto costo computacional de la totalidad de los modelos analizados, se procedió a ocupar sólo los primeros 40s del registro sísmico. Se consideró ese lapso ya que en él se concentran las mayores aceleraciones del registro, estando el sismo en su mayor intensidad. Para verificar que las máximas respuestas sean obtenidas con el registro sísmico truncado, se determinó el espectro de respuesta de ambos registros, el completo y el truncado a 40 segundos. Los resultados que se muestran en la Figura 16 indican que existen diferencias significativas entre los valores espectrales de ambos registros sólo para períodos bajos, menores a 0.25 segundos. Estos períodos son muy inferiores que los períodos de aislamiento considerados (entre 3 y 5 segundos) y también menores a los períodos fundamentales de los racks analizados en condición de base fija (Tabla 2). Lo anterior valida el uso del registro sísmico truncado para la determinación de la respuesta máxima de los racks considerados, ya que no existirían diferencias apreciables entre los resultados obtenidos con el registro completo y el truncado en los casos analizados.

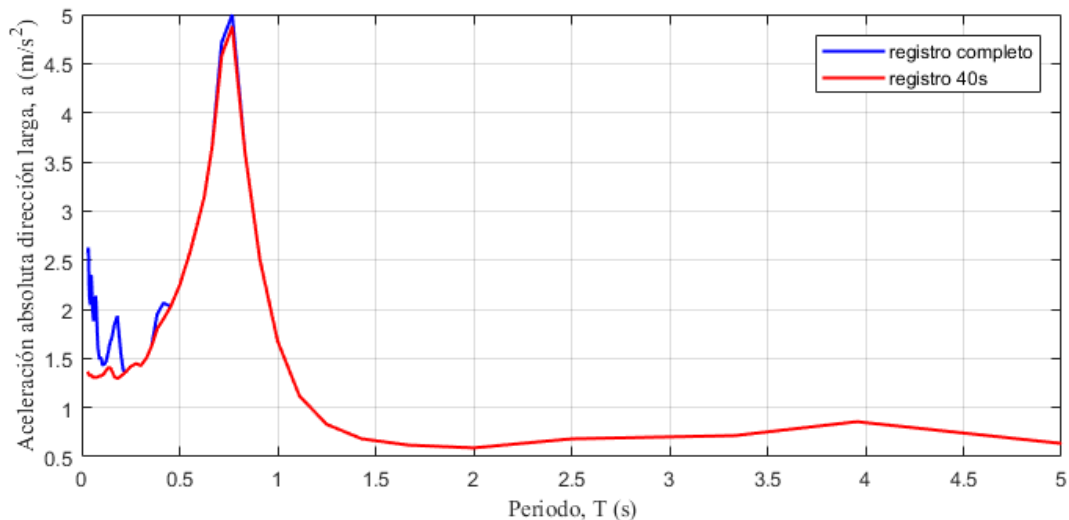


Figura 16: Espectros de respuesta del registro sísmico compatible completo y truncado a los 40 seg.

Para todos los casos analizados se procedió a extraer las respuestas máximas en la dirección larga (eje x), que es aquella donde los racks son más flexibles. Se consideró como respuestas de interés los valores máximos de: desplazamiento relativo entre niveles (Drif), la aceleración absoluta horizontal (\ddot{u}_{abs}), y corte basal (Q_0). Adicionalmente se determinó el período fundamental de cada rack fijo en su base, T_f , para tener en cuenta en la asignación de período de aislamiento, T_a , cumpliendo con $T_a > T_f$. Los resultados antes mencionados se muestran para los 4 modelos de racks con apoyo fijo en Tabla 2.

Tabla 2: Respuestas máximas de racks con apoyo fijo en su base.

Niveles del Rack	Drif (m)	\ddot{u}_{abs} (m/s ²)	Q_o (N)	T_f (s)
2	0,14435	-29,64	10424,9	0.436
3	-0,43436	17,08	8219,5	1.164
4	0,617	-19,03	8132,3	2.195
5	-0,89711	19,24	10065,5	3.4897

Para los modelos con aislamiento basal se realizó lo mismo, a partir de las tablas entregadas por el software. Para cada caso se determinó los valores máximos absolutos de las respuestas de interés antes mencionadas. Para una mejor interpretación de los resultados se graficaron las respuestas de cada estructura en proporción a la correspondiente respuesta máxima de la condición con apoyo fijo. Es decir, se muestra en las Figuras 17 a la 20 el factor de reducción de la respuesta con aislamiento basal, respecto a su condición con apoyo fijo.

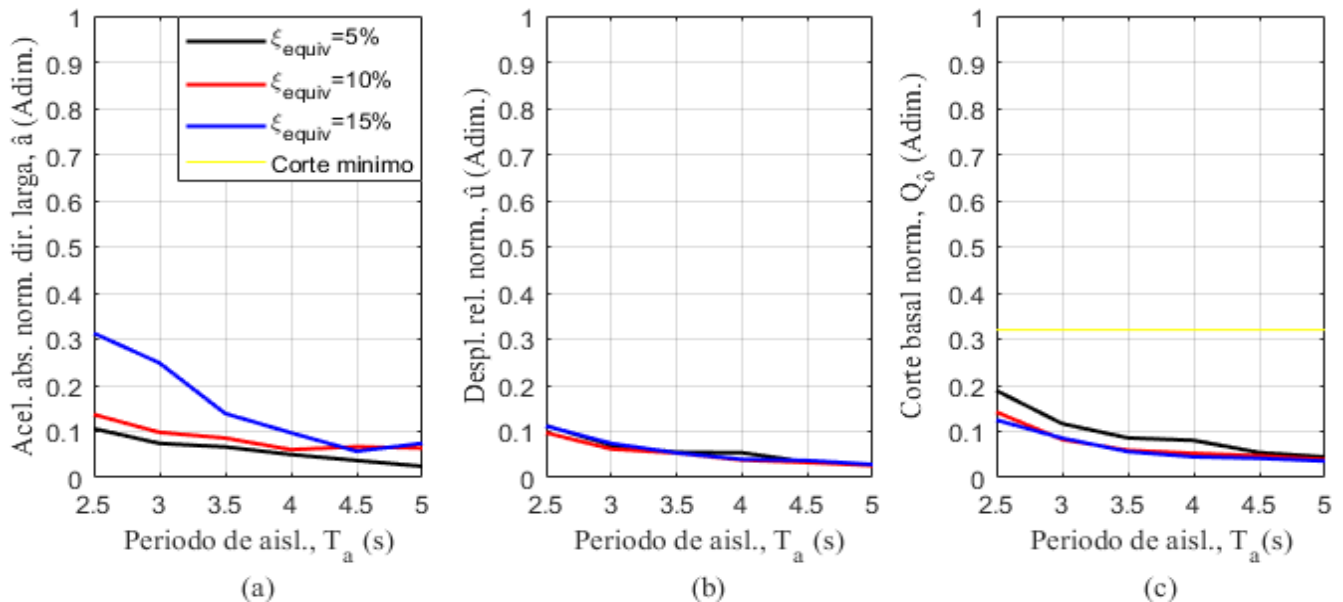


Figura 17: Factor de reducción de la respuesta máxima en racks de *dos niveles* en función del período de aislamiento y razón de amortiguamiento equivalente de la interfaz de aislamiento. (a) Aceleración absoluta, (b) Desplazamiento relativo, (c) Corte basal.

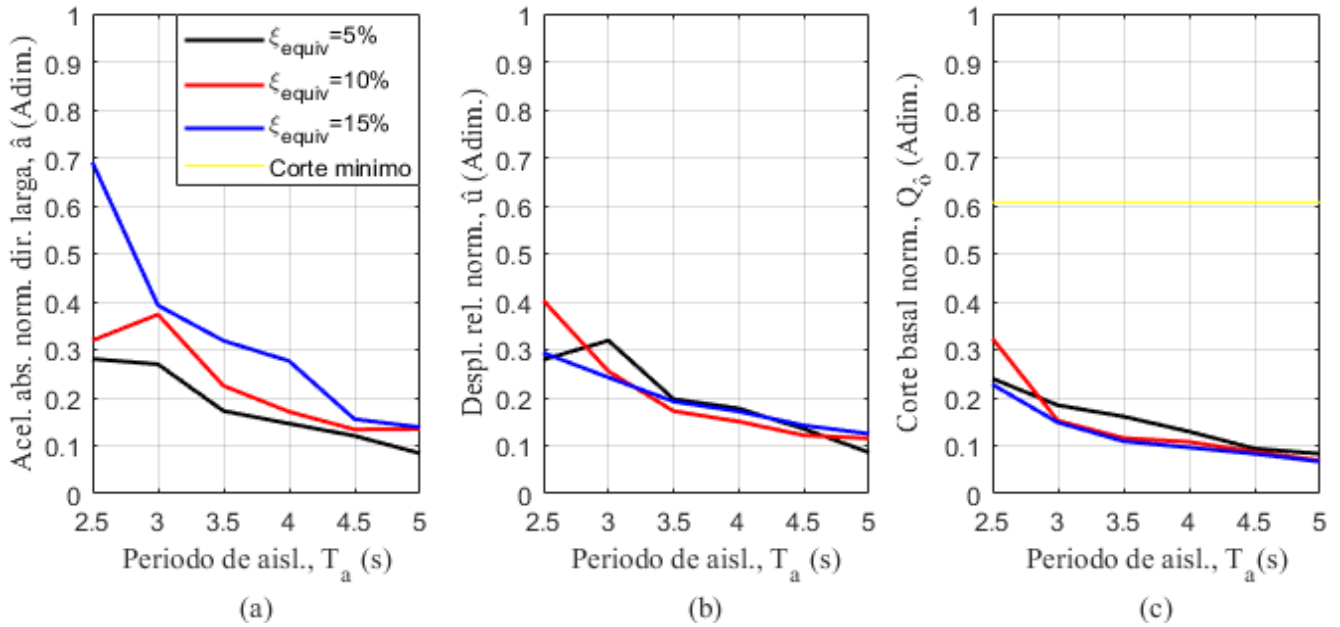


Figura 18: Factor de reducción de la respuesta máxima en racks de *tres niveles* en función del período de aislamiento y razón de amortiguamiento equivalente de la interfaz de aislamiento. (a) Aceleración absoluta, (b) Desplazamiento relativo, (c) Corte basal.

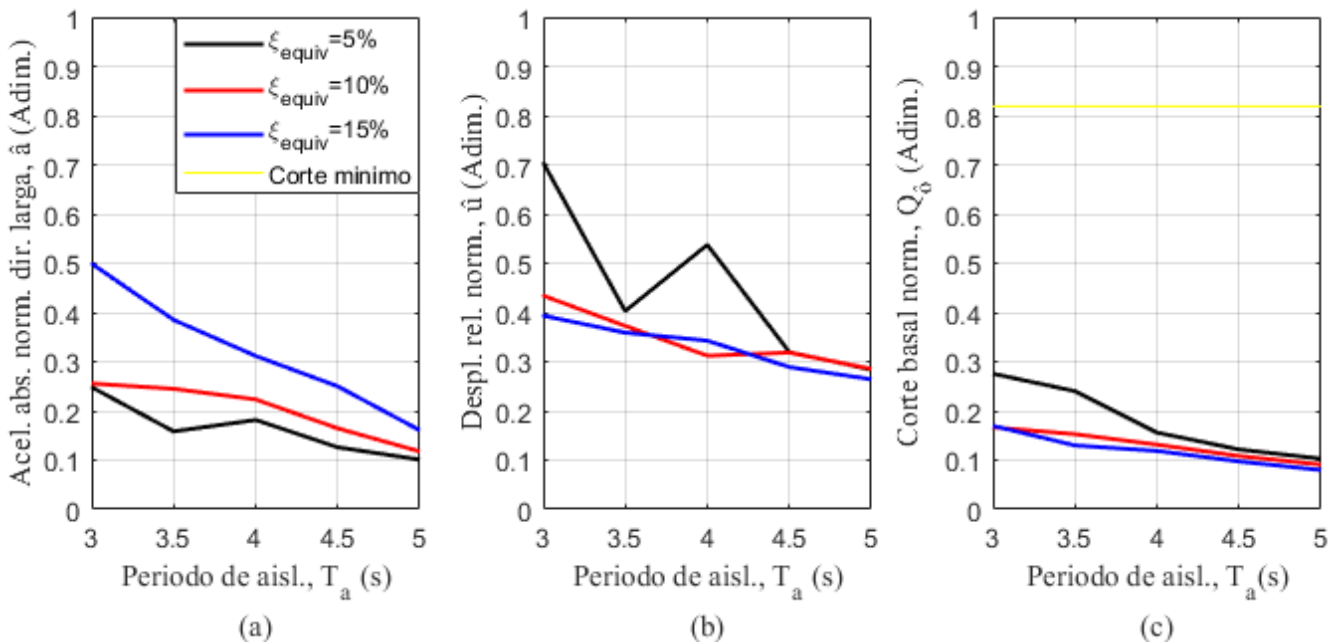


Figura 19: Factor de reducción de la respuesta máxima en racks de *cuatro niveles* en función del período de aislamiento y razón de amortiguamiento equivalente de la interfaz de aislamiento. (a) Aceleración absoluta, (b) Desplazamiento relativo, (c) Corte basal.

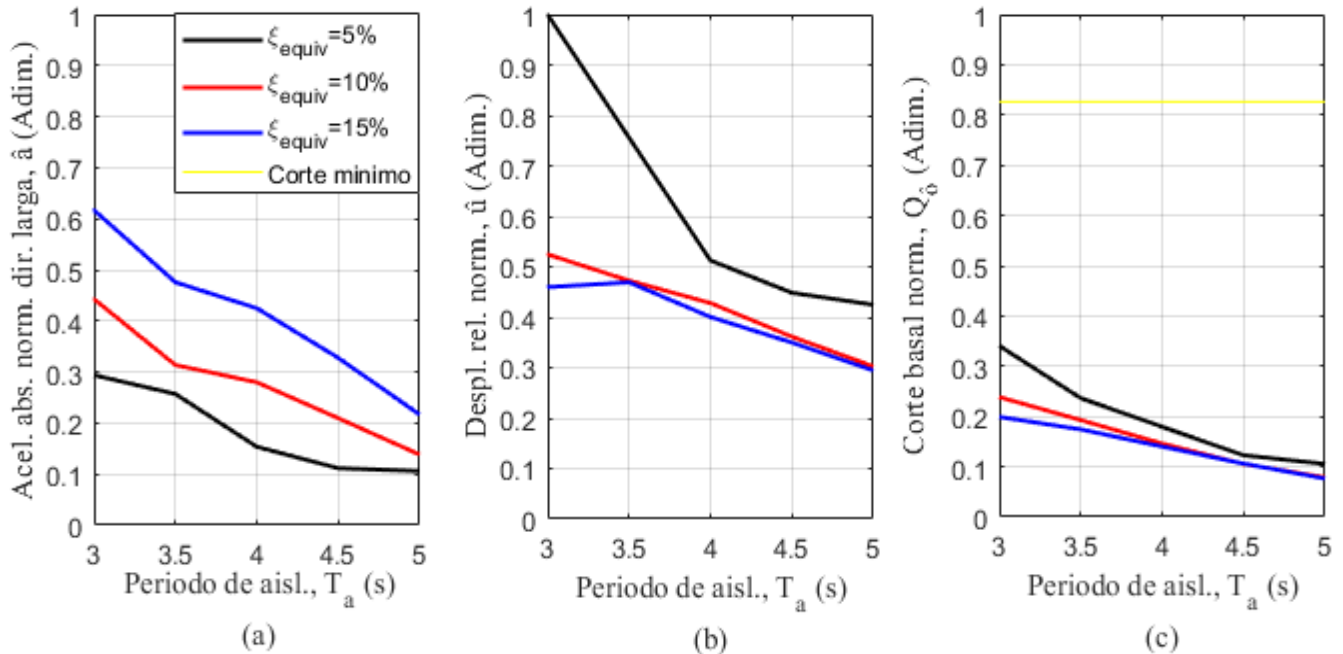


Figura 20: Factor de reducción de la respuesta máxima en racks de **cinco niveles** en función del período de aislamiento y razón de amortiguamiento equivalente de la interfaz de aislamiento. (a) Aceleración absoluta, (b) Desplazamiento relativo, (c) Corte basal.

Se observa que existe una reducción de las tres respuestas máximas de interés en todos los casos analizados, con diferentes grados de efectividad en cada uno de ellos y para cada respuesta considerada.

El rack que mostró los mayores beneficios con la incorporación del aislamiento fue el de dos niveles, teniendo las mayores reducciones en las tres respuestas (factores de reducción de respuesta más bajos). Los factores de reducción de respuesta de condición fija en la base variaron en este rack entre 0.024 y 0.30 para las aceleraciones absolutas; entre 0.035 y 0.12 para los desplazamientos relativos; y entre 0.026 y 0.18 para el corte basal. Esto corresponde a reducciones de hasta 2 órdenes de magnitud en las respuestas máximas de interés.

El rack menos beneficiado fue el de cinco niveles, registrándose factores de reducción de la respuesta de rack fijo en la base entre 0.11 y 0.61 para la aceleración absoluta; entre 0.28 y 1.0 para el desplazamiento relativo y entre 0.07 y 0.34 para el corte basal.

Lo anterior es consistente con las expectativas, ya que es sabido que el aislamiento basal es una muy buena estrategia de reducción de respuesta antes sismo en estructuras bajas y de período fundamental corto, perdiendo efectividad conforme la estructura se hace más alta y crece su período fundamental.

Se observó una reducción monótonica de la respuesta máxima de los racks con aislamiento basal conforme el periodo de aislamiento se incrementó. Los casos con periodos de aislamiento de 5 segundos presentaron las respuestas más reducidas respecto de la condición de rack fijo en su base en casi todos los casos. Excepción de lo anterior fueron la respuesta máxima de aceleración absoluta de los casos ca_2_5_15, ca_3_5_10 y ca_2_5_10. En dichos casos se observó un leve aumento de la respuesta máxima del rack con aislamiento respecto del rack fijo en su base para periodo de aislamiento de 4.5 s

Se determinó que, a mayor razón de amortiguamiento crítico equivalente en la interfaz de aislamiento, mayor fue la reducción de la respuesta del rack con aislamiento basal respecto del rack fijo en la base, esto es, el factor de reducción de la respuesta se acercó más a cero. Se observó una reducción mayor del desplazamiento relativo y de

corte basal que de la aceleración absoluta máxima al incrementar la razón de amortiguamiento. Resultó ser más efectivo el amortiguamiento máximo del 15% del crítico para reducir en mayor proporción tanto el corte basal como el desplazamiento relativo de piso en los racks analizados. Sin embargo, el mínimo amortiguamiento considerado de 5% del crítico fue el que condujo a las mayores reducciones de la aceleración absoluta de piso.

Se observa en los gráficos de las Figuras 17 a la 20 que existe una reducción en el corte basal para todos los casos de racks con aislamiento basal analizaos. Sin embargo, para visualizar la magnitud relativa de esta fuerza entre racks de diferentes alturas, se optó por hacer una normalización de ésta con respecto al peso sísmico de la estructura. De esta manera es posible comparar el corte basal normalizado entre racks de diferentes alturas en términos más cualitativos, ya que el corte basal normalizado por el peso sísmico es una especie de coeficiente sísmico (Tabla 3).

Tabla 3: Relación corte basal-peso sísmico

Niveles del Rack	$Q_{0,m\acute{a}x}^{(Aisl.)}$ (N)	Peso sísmico, P_s (N)	$\hat{Q}_{0,m\acute{a}x}^{(Aisl.)} = \frac{Q_{0,m\acute{a}x}^{(Aisl.)}}{P_s}$
2	1966,25	8350	0,24
3	2660,37	12525	0,21
4	2242,51	16700	0,13
5	3431,09	20875	0,16

Si bien es cierto que la mayoría de los casos analizados sigue una misma tendencia en cuanto a la reducción de las respuestas de interés, existen algunos casos que salen de la norma. Un ejemplo de lo anterior es el caso de análisis *ca_4_4_5*, para el cual se observa que la respuesta de desplazamiento máximo entre niveles y aceleración absoluta máxima se incrementa al aumentar el período de aislamiento desde 3.5 s a 4.0 s. Para determinar esto es una situación aislada se analizó la respuesta en el dominio del tiempo (Figura 21), con el fin de visualizar si los valores máximos mostrados en las gráficas de la Figura 19 son valores puntuales.

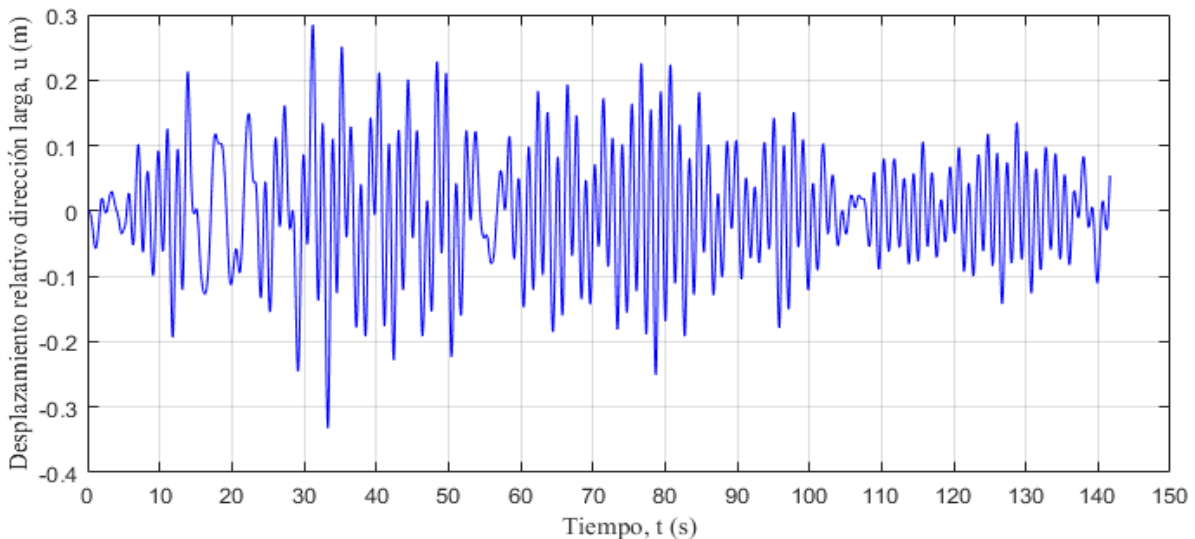


Figura 21: Serie de tiempo desplazamientos relativos en rack modelo *ca_4_4_5*

Para este caso el valor máximo de desplazamiento fue 0.332m, siendo los siguientes picos de desplazamiento máximo de 0.283m, 0.251m y 0.247m. Si bien podría considerarse un caso aislado, la diferencia no es tan considerable con respecto al pico siguiente (85% del máximo). Incluso considerando el segundo pico máximo de



desplazamiento, la gráfica de desplazamiento de la Figura 19 (b) mostraría una tendencia anómala en el caso *ca_4_4_5* por lo que el punto es efectivamente un caso fuera de la norma general.

4. CONCLUSIONES

Se verifica la efectividad del uso del sistema de aislamiento sísmico cinemático en la reducción de las respuestas máximas de desplazamiento de entre piso, aceleración absoluta y corte basal en los racks selectivos de 2 a 5 niveles de altura. Las respuestas de interés se vieron fuertemente influenciadas por la incorporación del sistema de aislamiento basal, mostrando reducciones de respuesta de hasta 2 órdenes de magnitud con respecto al mismo rack con base fija.

Los racks más beneficiados con este sistema de aislamiento fueron los racks de 2 niveles donde las aceleraciones absolutas se redujeron al 2.44% del valor correspondiente al rack fijo, para el caso con período de aislamiento de 5 segundos y 5% de razón de amortiguamiento equivalente. El desplazamiento relativo entre niveles se redujo a 3.5% del correspondiente al rack de 2 niveles fijo en su base, para el caso con período de aislamiento de 5 segundos y 15% de razón de amortiguamiento en la interfaz de aislamiento. En el mismo caso anterior, el corte basal se redujo a 2.6% del valor máximo correspondiente al caso con base fija.

En general, el incremento del período de aislamiento condujo a mayores reducciones de las tres respuestas máximas de interés estudiadas en esta investigación. En cuanto a la razón de amortiguamiento en la interfaz de aislamiento se obtuvo que, en general, a mayor amortiguamiento, mayor fue la reducción del desplazamiento relativo máximo y corte basal máximo. En tanto que, para el caso de la aceleración absoluta máxima, las mayores reducciones de respuesta se obtuvieron para menores valores de la razón de amortiguamiento en la interfaz de aislamiento.

En todos los casos analizados, con todos los períodos de aislamiento y razones de amortiguamiento considerados, todas las respuestas de interés registraron reducciones respecto de los valores obtenidos para el mismo rack con base fija. Por lo tanto, se recomendaría utilizar aislamiento con periodo largo y razón de amortiguamiento baja del orden del 5% del crítico para obtener reducciones considerables en todas las respuestas del rack.



5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bernuzzi, C. (2015). European and United States approaches for steel storage pallet rack design: Part 1: Discussions and general comparisons. *Thin-Walled Structures*, 97, 308-320.
- [2] Michael, R. J., Courtwright, J. A., Ferro, E. B., Filiatrault, A., Higgins, P. S., & Wanitkorkul, A. (2010, July). Development of a new base isolation system for seismic isolation of steel pallet storage racks. In *Proceedings, 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering (9USN10CEE)* (Vol. 10).
- [3] Chen, C. K., Scholl, R. E., & Blume, J. A. (1980). Earthquake simulation tests of industrial steel storage racks. In *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey* (pp. 379-386).
- [4] Davidson, B. J., & McBride, A. P. (2011, April). Design recommendations for the improvement of the seismic performance of steel storage racks. In *9th Pacific conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand, NZSEE. Paper*(Vol. 65, No. 8).
- [5] http://docs.csiamerica.com/help-files/csibridge/Advanced_tab/Assign/Kinematic_Hysteresis_Model.htm
- [6] Alfanda, A. M. U., & Kiyamaz, G. (2017). Investigation of seismic behaviour of steel pallet rack frames. *American Journal of Engineering and Technology Management*, 2(2), 13-19.
- [7]Carvalho, G., Bento, R., & Bhatt, C. (2013). Nonlinear static and dynamic analyses of reinforced concrete buildings-comparison of different modelling approaches. *Earthq. Struct*, 4(5), 451-470.
- [8].Bathe, K. J., & Wilson, E. L. (1972). Stability and accuracy analysis of direct integration methods. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1(3), 283-291.
- [9] Sarawit, A. T., & Peköz, T. (2006). Notional load method for industrial steel storage racks. *Thin-Walled Structures*, 44(12), 1280-1286.
- [10] Maureira, 2018